

Pavel Příhoda

Měsíce ve sluneční soustavě (1. část)

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 49 (2004), No. 3, 206--217

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/140853>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2004

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [7] RABINOWITZ, P. H.: *Some global results for nonlinear eigenvalue problems*. J. Funct. Anal. 7 (1971), 487–513.
- [8] MARINO, A., PRODI, G.: *La teoria di Morse per gli spazi di Hilbert*. Rend. Sem. Mat. Univ. Padova 41 (1968), 43–68.
- [9] AMBROSETTI, A.: *Branching points for a class of variational operators*. J. d'Analyse Math. 76 (1998), 321–335.
- [10] AMBROSETTI, A., BADIALE, M.: *Variational perturbative methods and bifurcation of bound states from the essential spectrum*. Proc. Royal Soc. Edinburgh 128A (1998), 1131–1161.

Měsíce ve sluneční soustavě (1. část)

Pavel Příhoda, Praha

Celková charakteristika

Ve sluneční soustavě se setkáme s tělesy různých typů. Centrální těleso, Slunce, je hvězdou vcelku obvyklého typu — s mírně nadprůměrnou hmotností, svítivostí i průměrem a stářím. Po Slunci se největší hmotností vyznačují planety. Mnohem menší a četnější jsou planetky čili asteroidy, nazývané také planetoidy. Počet objevených planetek s určenou dráhou rychle roste, koncem roku 2003 to bylo téměř čtvrt milionu, a není vyloučeno, že se brzy dostaneme přes milion. Nejpočetnější jsou však kometární jádra. Většina jich ovšem obíhá daleko za dráhou Pluta v takzvaném Oortově oblaku a ke Slunci se v dohledné době nepřiblíží, takže jejich počet pouze odhadujeme. Nejčastěji uváděný odhad je 10^{12} , někdy se připouští dokonce 10^{13} .

Velká většina těles sluneční soustavy obíhá přímo kolem Slunce, tedy po heliocentrických drahách. Obvykle se říká, že obíhají v elipsách. Přesně to ovšem neplatí. Gravitační síly mezi planetami způsobují poruchy oběžných drah, což se projevuje změnami jejich elementů. U některých těles nejsou tyto změny nijak velké, u jiných jsou naopak nápadné.

V tomto článku věnujeme pozornost tělesům, pro která používáme termín satelity, česky měsíce a podle starší literatury také družice. Malé satelity pak označujeme jako měsíčky. Tato tělesa a tělíka neobíhají přímo kolem Slunce, ale kolem některých planet, tedy po planetocentrických drahách. I ona patří samozřejmě k objektům sluneční

Ing. PAVEL PŘÍHODA (1934), Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Královská obora 233, 170 21 Praha 7.

soustavy a se svými planetami obíhají kolem Slunce. Pokud si graficky znázorníme jejich dráhy vzhledem ke Slunci, zjistíme, že na oběžné dráhy satelitů je možno většinou nahlížet jako na dráhy heliocentrické, pouze výrazně rušené gravitační silou planety, kolem níž obíhají. Názorné to je na dráze Měsíce vůči Slunci. Velká poloosa dráhy Země kolem Slunce je zhruba 389krát delší než velká poloosa dráhy Měsíce kolem Země. Měsíční dráha uvažovaná vzhledem ke Slunci má pak tvar zkrácené epicykloidy; tak zkrácené, že je od zemské dráhy těžko rozeznatelná. Projevuje se to i tím, že nevykazuje klíčky, které máme v povědomí u obvyklých epicykloid, ale je v každém okamžiku dutá vůči Slunci. Poloměr křivosti této „heliocentrické“ měsíční dráhy má proto stále kladnou hodnotu, největší kolem novu (1,73 AU), nejmenší v době úplňku (0,73 AU).

Počet, pohyb a hmotnosti satelitů

Termín „satelit“ nebo „měsíc“ nabyl smyslu teprve tehdy, když M. Koperník v roce 1543 uveřejnil své dílo *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Libri VI. Na rozdíl od Ptolemaiovy geocentrické soustavy zůstalo Zemi jediné těleso, které kolem ní obíhá jako satelit — Měsíc. Galileiho objev čtyř největších satelitů Jupitera byl krásným důkazem, že kolem většího tělesa obíhají menší. Dalších pět satelitů bylo objeveno ve druhé polovině 17. století u Saturna. Zkrátka, tento druh objektů se v astronomii začal považovat za samozřejmost a nikoho příliš nepřekvapilo, když roku 1787, šest let po objevu Uranu v roce 1781, našel sám objevitel planety W. Herschel její dva měsíce. Také v 19. a v první polovině 20. století byly postupně obječovány další satelity, každý objev byl však astronomickou událostí a počet známých měsíců planet se řadu let neměnil. V padesátých letech dvacátého století bylo kromě jednoho satelitu Země a dvou měsíčků Marsu známo 12 měsíců Jupitera, 9 Saturna, 5 Uranu a 2 Neptuna. Byly to idylické doby, které však měly záhy skončit. Počet nově známých satelitů začal narůstat zejména po průletech Voyageru 2 kolem velkých planet. Později přišly znovu ke slovu i pozemní prostředky. Velké dalekohledy vybavené kvalitními digitálními kamerami začaly objevovat satelity jak na běžícím pásu. Dávno už nikdo nepoužívá formulaci, že daná planeta má tolik a tolik měsíců, ani už nestačí napsat, kolik jejích měsíců známe. Dnes musíme vždycky uvést počet měsíců známých k určitému datu. Seznam hodnot fyzikálních veličin satelitů, který uveřejňuje NASA, uvádí k 26. únoru 2002 celkem 90 satelitů planet, k 11. květnu 2004 už 133. K tomuto datu známe následující počty přirozených měsíců planet: Země 1, Mars 2, Jupiter 61, Saturn 31, Uran 24, Neptun 13 a Pluto 1 satelit. Jejich celková hmotnost je ale jen 12% hmotnosti Země. Přitom víme, že jsou již sledovány další měsíce. Před jejich definitivním započtením je však nutné určit jejich dráhu.

Měsíce dostávaly své názvy nejčastěji podle návrhů objevitelů. Dnes se k nim také přihlíží, jsou však stanoveny přesné zásady pro pojmenování, což má na starosti pracovní skupina 5. komise Mezinárodní astronomické unie. Jde už nejen o jména měsíců, ale i o nomenklaturu jejich povrchových útvarů. Zásady pro nomenklaturu by vyžadovaly zvláštní článek a jen příležitostně se o nich zmíním u jednotlivých satelitů.

Při vzrůstajícím počtu nově objevených satelitů se také ukázalo jako užitečné použít před definitivním pojmenováním předběžné označení objektů. Tak například objekt Sycorax měl před definitivním pojmenováním označení S/1997 U2. První písmeno S jako satelit odlišuje nově objevené těleso od ostatních, například od planetek. Po lomítku následuje rok objevu, U značí, že jde o satelit Uranu a poslední číslo udává, že jde o druhý satelit Uranu objevený v daném roce. Kromě toho jsou měsíce také definovány jménem planety a římským číslem, kupříkladu Sycorax je Uran XVII.

Drahami satelitů jsou elipsy, pro něž jsou zjištěny elementy: délka velké poloosy, excentricita a další hodnoty nutné pro výpočet poloh. Sklon roviny dráhy se udává různě. Pro náš Měsíc se sklon vztahuje k rovině ekliptiky, u Marsu, Jupitera, Saturna a Neptuna se většinou za základní rovinu bere lokální Laplaceova rovina, která je velmi blízká rovině rovníku planety. (Přesněji řečeno — Laplaceova rovina je rovina proložená těžištěm soustavy a kolmá k vektoru jejího celkového úhlového momentu.) U planety Uran, která má velký sklon rotační osy, se obvykle za základní rovinu bere rovina jeho rovníku. Nově objevené satelity mívají uváděné sklony drah vztaheny na rovinu ekliptiky. Konečně satelit Pluta, Charon, má elementy své dráhy vztaheny zhruba řečeno na nebeskou sféru, přesněji na rovinu tečnou k nebeské sféře a procházející planetou. Přesně je však tato rovina vztahena na systém ICRF (International Celestial Reference Frame).

Není snad třeba zvláště zdůrazňovat, že pro pohyb měsíců platí všechny zákony nebeské dynamiky a také Keplerovy zákony, kde centrálním tělesem je příslušná planeta. Dráhy se však mohou měnit gravitačním působením okolních satelitů; případy, kde je to zvlášť nápadné, ovšem uvedeme. Hmotnosti satelitů jsou většinou ve srovnání s hmotností jejich centrálních planet velmi nepatrné. Například hmotnost Jupitera je 12 808krát větší než hmotnost jeho nejmasivnějšího měsíce Ganymeda, takže těžiště této dvojice leží velice blízko středu planety (přesto jsou oba body od sebe vzdáleny 83 km!). Jsou však i výjimky. Hmotnost Země je jen 81,3krát větší než hmotnost Měsíce. Těžiště soustavy Země–Měsíc je proto vzdáleno od zemského středu 4670 km, a leží tedy ještě uvnitř zemského tělesa. Pro výpočet poloh ostatních těles je však nutno brát v úvahu i tento „oběžný“ pohyb Země kolem těžiště soustavy. S problémy se setkáváme v blízkém okolí velkých planet, kde kromě normálních satelitů pozorujeme také prstence. Většinou jde o velké množství minisatelitů od velikosti desítek metrů až do jemného prachu, obíhajících na podobných planetocentrických drahách. Vzájemným působením jejich ohromného množství vznikají různé efekty.

Kromě oběžného pohybu satelitů měsíce také rotují. Původně se zřejmě otáčely v různých periodách. Vzájemné slapové působení měsíce a planety vedlo ke zpomalení rotace obou těles. Rotace planety se zpomalila zcela zanedbatelně, zato rotace satelitu se zpomalila natolik, že satelit přešel do vázané rotace. K planetě se nadále natáčel jedinou polokoulí (přivrácenou), zatímco opačná polokoule zůstala od planety trvale odvrácena. Protože periodu rotace vyjadřujeme vzhledem ke hvězdám, je perioda rotace u těchto satelitů rovna době oběhu a Slunce osvětluje obě polokoule. Vázanou rotaci má většina satelitů bližších planetě, u těch vzdálenějších periody rotace většinou neznáme. Dále se ukázalo užitečné rozlišovat polokouli, která leží při oběhu měsíce „vpředu“ a „vzadu“, jako přední polokouli (anglicky leading hemisphere) a zadní

polokouli (trailing hemisphere). To proto, že se obě polokoule od sebe u některých satelitů výrazně liší. Na značné části satelitů známe povrchové útvary a kartografové pořídili jejich mapy. Proto jsou na nich také definovány souřadnicové soustavy. Nulový poledník satelitů s vázanou rotací míří ke středu planety, kolem které obíhají.

Počtem umělých satelitů, pro které se v češtině používalo označení umělé družice a nyní většinou prostě družice, se zabývá zvláštní statistika. Kolem Země obíhají tisíce těchto těles, své umělé družice má Venuše, Mars, Jupiter a od června 2004 také Saturn. Pro úplnost ještě dodejme, že sonda Galileo na své cestě k Jupiteru objevila 28. srpna 1993 první satelit planety. Záběry planety Ida ukázaly, že kolem ní obíhá malý měsíček nazvaný Dactyl. Podobných případů je ale více. Umělé družice ani satelity planetek však nejsou předmětem tohoto článku.

Druhy satelitů podle původu

Z detailních analýz známých satelitů se začíná stále zřetelněji ukazovat jejich rozdílný původ. Nejtýpčtější měsíce vznikly přímo během procesu vzniku velkých planet, zejména Jupitera a Saturna. Slunce se vytvořilo uprostřed prachoplynného protoplanetárního disku a planety se zformovaly z jeho středních a obvodových částí procesem akrece — spojováním menších těles ve větší. Akrece převládla nad srážkami těles. Jupiter se Saturnem, Uranem a pravděpodobně i Neptunem se zřejmě vytvářely podobným procesem jako Slunce, ale v menších prachoplynných discích. Ze středové oblasti každého disku vznikly planety, z okrajových partií pak menší tělesa — satelity. U Jupitera jde určitě o čtyři tzv. galileovské satelity Io, Europa, Ganymed a Kallisto. V případě Saturna jde nepochybně o satelit Titan a zřejmě i několik dalších, u Uranu jsou to měsíce Miranda, Ariel, Umbriel, Titania a Oberon. Jsou to satelity relativně velké, které obíhají ve střední oblasti soustavy měsíců dané planety blízko roviny jejího rovníku a jejich dráhy jsou velice blízké kružnicím.

Druhý typ satelitů obíhá blízko svých centrálních planet. Jde většinou o nevelké objekty, jejich dráhy mají malou excentricitu a jejich rotace je opět vázaná. Řada těchto satelitů vykazuje těsnou souvislost se soustavou prstenců planety. Půjde tedy zřejmě buď o původní měsíčky planet, nebo by mohlo jít o planetky či planetesimály, které byly zachyceny z heliocentrických drah už v době, kdy vznikající planeta byla ještě obklopena plynným oblakem.

Třetí typ satelitů vznikl určitě zachycením už vzniklých těles — planetek. Byly nalezeny u všech velkých planet: Jupitera, Saturna, Uranu i Neptuna. Setkáváme se tu s několika shodnými znaky:

1. Jde o satelity ve velké vzdálenosti od planety, která je zachytila, tedy na okraji soustavy jejích satelitů.

2. Dalším společným znakem těchto tělísek je orientace dráhy: zachycené satelity mívají sklon dráhy větší než 90° , typicky od 140° do 170° . Sklony drah těchto satelitů jsou obvykle vztaženy k rovině ekliptiky. Znamená to, že při pohledu od severního nebeského pólu planety obíhají retrográdně, tedy ve zpětném smyslu, ve směru otá-

čení hodinových ručiček. Naproti tomu planety na heliocentrických drahách obíhají vesměs v kladném smyslu, proti směru otáčení hodinových ručiček, mají přímý pohyb.

3. Dráhy těchto satelitů mají větší excentricitu.

4. Většinou jde o objekty velikosti jen několika kilometrů a taková tělesa mají nepravidelný tvar.

Komentáře k objevům třetího typu satelitů většinou uvádějí, že v současné sluneční soustavě je velice nepravděpodobné zachycení planety z heliocentrické dráhy na planetocentrickou. Soudí, že k tomu muselo dojít v rané etapě vývoje sluneční soustavy. Navrhují dva modely:

1. Během procesu vzniku Jupitera byl Protojupiter obklopen rozsáhlou atmosférou. Při průchodu planetek touto atmosférou se tělíska zpomalila. Část tělísek spadla na planetu, část se zpomalila jen natolik, že přešla na eliptické planetocentrické dráhy. Dodejme, že pohyb měsíčků ve zpětném smyslu znamená, že musely být zachyceny v oblasti mezi Sluncem a Jupiterem.

2. Rychlý růst Jupitera během vzniku planet způsobil, že mladá planeta zachytila na oběžné dráhy planetesimály pohybující se po blízkých drahách. Planetesimály jsou malá tělesa, jejichž spojováním vznikala větší až do velikosti planet. Tento proces už nemohl proběhnout, když byla tělíska zachycena na planetocentrických drahách.

S. Shepard, spoluobjevitel jedenácti měsíčků Jupitera, uvádí, že v případě platnosti 1. modelu musí existovat hranice pro velikost malých objektů, které by byly v plynném prostředí více brzděny než velké. Platí-li druhý model, nezjistí se žádná hranice velikosti měsíčků. Shepard se spolupracovníky dává přednost prvnímu modelu, protože mu velikosti měsíčků vyhovují. Soudí také, že Jupiter má více než 100 satelitů větších než 1 km. Je však třeba upozornit, že oba modely se vlastně nevylučují a mohly by platit současně.

Není však zřejmě nutné předpokládat, že by přechod z heliocentrické dráhy na planetocentrickou nemohl nastat ani v současnosti. Připomeňme třeba zachycení komety Shoemaker-Levy 9 Jupiterem, třebaže na nestabilní dráhu. Mohl tu hrát roli plynný obal komety a také negravitační jevy kometárního jádra (výrony plynů, které mohou měnit heliocentrickou dráhu komet). Také gravitační síly velkých satelitů a planety by mohly zachytit blízko se pohybující planetku. Některé vnější satelity planet mohly být původně kometárními jádry, které postupně ztratily plynnou složku. Známe planety na heliocentrických drahách, které jsou právě takovými „vyhaslými“ kometárními jádry, např. (3200) Phaethon. Z heliocentrické dráhy je možné zachytit také dvojici těles — není tedy zřejmě náhoda, že kolem Marsu obíhají právě dva satelity, které jsou evidentně zachycenými planetkami.

Měsíčky Marsu

Jde o dvě nevelká tělesa **Phobos** a **Deimos**. První z nich má rozměry 28/22/18 km a obíhá po dráze s velkou poloosou 9380 km, tedy 5983 km nad povrchem planety. Nejdelší osy obou těles stále míří k planetě. Oběžná doba Phobosu je 7 hodin 39 minut. Měsíček obíhá v kladném smyslu, proto se v okolí rovníku vynořuje na obloze Marsu

na západě a zapadá na východě. Na povrchu jsou zmapovány četné impaktní krátery. Od největšího z nich o průměru 10 km, pojmenovaného Stickney, se rozbíhá soustava brázd. Jinde nacházíme systém rovnoběžných rýh.

Měsíček Deimos je skromnější, má velikost 16/12/10 km, oběžnou dobu 30 hodin 18 minut a velkou poloosu dráhy 23 460 km. Kráterů na tomto tělese pozorujeme méně, protože většina je skryta pod vrstvou sypkého materiálu na povrchu měsíčku, takže Deimos se jeví jako hladší.

Průměrná hustota Phobosu je $1867 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, Deimosu $2247 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, albedo obou je nízké, 0,071 a 0,068. To jsou hodnoty, které se blíží hustotám jednoho druhu meteoritů, tzv. uhlíkatých chondritů, a hustotám i albedu planetek typu C. Máme zde tedy další argument ve prospěch tvrzení, že skutečně jde o zachycené planetky.

Galileovy měsíce — největší satelity Jupitera

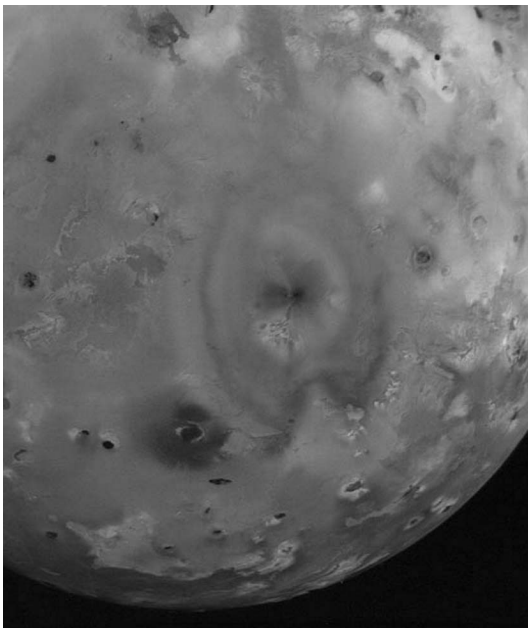
Galileo Galilei poprvé pozoroval tři z těchto měsíců 7. ledna 1610, když zkoušel svůj dalekohled. Usoudil, že jde o hvězdy v blízkosti planety Jupiter. Další noc zjistil, že se tyto objekty pohybují, a 11. ledna spatřil čtvrtý objekt, později nazvaný Ganymed. Po týdně došel k závěru, že tělesa stále setrvávají u Jupitera, a později se ujistil, že kolem planety obíhají. Byl to silný argument pro správnost Koperníkovy soustavy. V březnu 1610 publikoval Galilei svůj objev spolu s dalšími ve spisku Sidereus Nuncius (Hvězdný posel).

Je známo, že na objev si dělal nárok S. Marius, který údajně tyto satelity sledoval již v listopadu 1609. Protože však svá pozorování nepublikoval dřív než Galilei, nebylo možné prvenství jeho objevu ověřit. Inu, i tehdy platilo „publish or perish“. Marius dal alespoň satelitům jména, která se ujala: Io, Europa, Ganymed, Kallisto.

Tyto měsíce mají zhruba kulový tvar s neznatelným zploštěním a jejich průměrné hustoty klesají s rostoucí vzdáleností od planety. To je jasný příznak, že vznikaly během formování Jupitera a že šlo o proces podobný vzniku planet ve sluneční pramlhovině, ovšem v menším měřítku.

Io

Tento měsíc je těleso o málo větší než náš Měsíc, má průměr 3643 km. Kolem planety obíhá ve vzdálenosti 421 800 km, s periodou 1,769 138 dne. Střední hustota je $3528 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, což je hustota blízká bazaltu (čediči), $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Není to náhoda. Io je vulkanicky nejaktivnější známé těleso. Při průletech sond Voyager 1 a 2 bylo aktivních 6 a 7 vulkánů. Erupce jsou explozivní, materiál je vyvrhován rychlostí až $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ do výšek až 500 km, část dokonce opouští gravitační pole satelitu. Vulkanismus je vyvoláván slapovým působením Jupitera a jeho satelitů, které opakovaně vytvářejí stometrovou přílivovou vlnu v kůře tělesa, jakmile se Io dostane mezi mateřskou planetu a Europu nebo Ganymeda. Když deformace pomine, vrací se Io do původního tvaru, a tím dochází k zahřívání tělesa. Pokud jde o nitro měsíce,



Obr. 1. Na celém povrchu Jupiterova měsíce Io pozorujeme intenzivní vulkanickou činnost. (Foto: NASA.)

předpokládá se, že je tvořeno silikáty a má kovové jádro nejspíše ze sulfidů železa a železa s niklem.

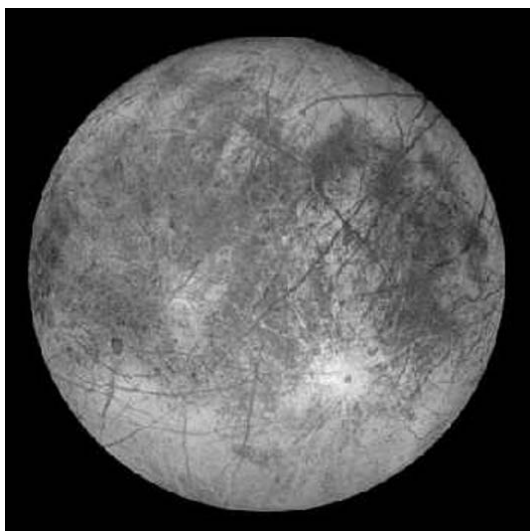
Na povrchu Io pozorujeme velké kaldery (krátery s rovným dnem, vzniklým explozí nebo poklesem), lávové proudy a lávová jezera. Povrch se vulkanickou činností rychle mění a starší útvary zanikají. Zjišťujeme zde množství síry — černě je zbarvena u kráterů, červeně a žlutě ve větších vzdálenostech od vulkánů, což závisí na teplotě síry. Střední povrchová teplota je 143°C , ve vyvrženém materiálu $+97^{\circ}\text{C}$ a na hladině lávových jezer $+380^{\circ}\text{C}$. Terén je velmi nerovný, vrcholy dosahují výšky až 16 km. Vizuální geometrické albedo je vysoké: 0,61.

Io obíhá v intenzivním radiačním pásu Jupitera, z něhož na satelit dopadají energetické elektrony, protony a těžké ionty. Protože tato oblast rotuje spolu s Jupiterem, unáší naopak od satelitu vulkanické plyny a část vyvrženého materiálu, v množství asi $1\text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$. Materiál vytváří na dráze satelitu torus iontů, z něhož uniká ultrafialové záření. Z torusu vycházejí těžké ionty a jejich tlak rozšiřuje Jupiterovu magnetosféru na více než dvojnásobek velikosti, kterou by magnetosféra měla bez tohoto efektu. Navíc ionty síry a kyslíku z torusu vnikají do oblastí magnetických pólů Jupitera, kde způsobují polární záře. Měsíc svým pohybem v magnetickém poli planety účinkuje jako elektrický generátor a je spojen s Jupiterovou ionosférou plazmovou trubicí s výkonem 1,2 TW (400 kV a 3 MA). Ač to zní podivně, jde vlastně o elektricky vyhřívaný satelit. Také tento mechanismus se může podílet na přítomnosti vulkanických procesů.

Názvosloví povrchových útvarů vychází z božstev ohně, např. Prometheus, Pele, Ra. Z měnících se časových intervalů mezi po sobě následujícími vstupy satelitu do Jupiterova stínu určil v roce 1676 dánský astronom O. Römer poprvé rychlost světla.

Europa

Třebaže tento měsíc sousedí s měsícem Io, ani v nejmenším se mu nepodobá. Má průměr 3122 km a obíhá planetu ve vzdálenosti 671 100 km s periodou 3,551 181 dne. Střední hustota je ještě poměrně vysoká, ale menší, než má Io: $3013 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Pokles hustoty satelitů s rostoucí vzdáleností od Jupitera budeme sledovat i později. Albedo tělesa je jedno z největších ve sluneční soustavě: 0,67. Kdyby byla Europa od Země stejně daleko jako Měsíc, zářila by desetkrát jasněji. G. Kuiper v 70. letech 20. století jako první ukázal, že kůra satelitu sestává z vody a ledu. Takový druh materiálu se předtím v těchto oblastech vůbec nepředpokládal, ale dnes víme, že právě on je charakteristický pro satelity daleko od Slunce. Podrobnosti na povrchu Europy zobrazily poprvé sondy Voyager a detailně byl satelit všestranně sledován též sondou Galileo.



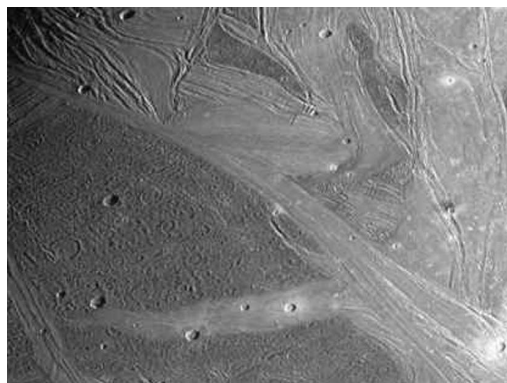
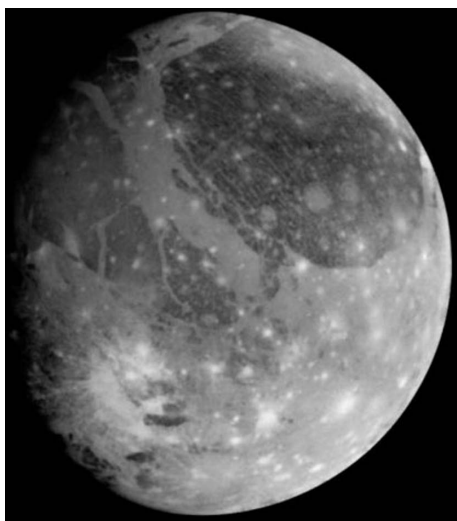
Obr. 2. Ledový povrch Jupiterova měsíce Europa ukazuje četné praskliny v ledové vrstvě, které jsou znovu zaceleny ledem. Povrch je extrémně hladký; je to důsledek tečení nepříliš zchlazeného ledu. (Foto: NASA.)

Ledový povrch je mladý, se stářím útvarů nejvýš 10^7 roků, s nevelkými vyvýšeními. Téměř postrádá impaktní krátery, které jsou tak typické u většiny satelitů. Zato na něm pozorujeme četné praskliny a brázdy, které opravdu připomínají popraskaný led. Z jejich změn se usuzuje na vnitřní aktivitu tělesa. Praskliny mají délku až 3000 km a šířku do 200 km. Zaplnila je voda, která opět zmrzla. Jejich pojmenování je převzato z řecké báje o Europě, například Minos Linea, Adonis Linea. Led nemá příliš nízkou teplotu, takže pomalu teče a vyrovnává vzniklé nerovnosti. Největší zaznamenané vrcholy dosahují výšky pouze 1600 m. Impaktních kráterů je zaznamenáno jen několik, největší o průměru 50 km, a zřejmě zanedlouho zanikají. Přestože přímo na povrchu byla změřena teplota -148°C , v hlubších vrstvách se předpokládá kapalná voda. V ledovém materiálu Europy probíhají procesy, které mají charakter vulkanismu a označují se jako ledový vulkanismus. Dochází k nim vlivem slapového působení Jupitera na Europu a také objemovými změnami ledu při změnách teplot a tlaku. S podobnými procesy se setkáváme i u některých jiných, vzdálenějších satelitů.

Vnitřní stavba je pozoruhodná. Pod vrstvou ledu o tloušťce od několika km do 10 km je oblast kapalné vody, možná místy prostoupená ledem, o hloubce pravděpodobně 100 km; je-li tomu tak, pak je na satelitu více vody než na Zemi. Pod ní je vrstva hornin a u středu jádro z kovů nebo jejich sloučenin, které se projevuje slabým magnetickým polem. Za těchto podmínek se uvažuje o možnosti existence živých organismů ve vodní vrstvě nebo na jejím dně.

Ganymed

Máme zde před sebou největší měsíc sluneční soustavy, který svým průměrem 5262 km předčí i planetu Merkur (4880 km). Protože však má nízkou hustotu $1942 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, má Ganymed jen 45 % hmotnosti Merkura, $1,48 \cdot 10^{23} \text{ kg}$. Měsíc obíhá planetu ve vzdálenosti 1 070 400 km od jejího středu s oběžnou periodou 7,154 553 dne.*)



Obr. 3. Krajina satelitu Ganymed připomíná tmavými oblastmi a světlými nerovnostmi na první pohled pozemský Měsíc, jde však o led znečištěný horninou. (Foto: NASA.)

Povrch je tvořen směsí vodního ledu a hornin. Terén vykazuje dva odlišné typy — mladší světlejší plochy protínají soustavy rovnoběžných brázd, odjinud v této formě a materiálu neznámé, v názvosloví označované jako Sulcus. Mladší soustavy brázd překrývají starší a probíhají rozličnými směry, zjišťujeme zde zlomy kůry satelitu, poklesy a podobné procesy bohaté tektonické aktivity. Vrcholy brázd mají výšku

*) *Poznámka ved. redaktora:* Je pozoruhodné, že vzdálenosti Galileových měsíců od Jupitera vyjádřené v milionech kilometrů se téměř neliší od známé Titiovy-Bodeovy řady

$$0,4, \quad 0,7, \quad 1, \quad 1,6, \quad \dots,$$

která přibližně popisuje zákonitost v rozložení vzdáleností planet od Slunce vyjádřených v AU.

několik set metrů proti dolinám a od sousedních vrcholů jsou vzdáleny 10 až 15 km. Soustavy tvoří komplexní síť a táhnou se do vzdáleností i tisíců km. Starší útvary se jeví temnější, jsou zaoblené a jde o pozůstatky původních pánví. Bývalá pánev Galileo Regio je zhruba kruhová a zjišťujeme tu stopy někdejších valů. Celý útvar vznikl při grandiózním impaktu a má vskutku impozantní průměr 3200 km. Starší oblasti jsou pokryty četnými impaktními krátery, ale už značně erodovanými; méně je pochopitelně tento druh útvarů zastoupen v mladších oblastech — zato jsou nápadnější a kolem některých jsou světlé „paprsky“ vyvrženého materiálu, zřejmě ledu. Měření denních teplot sondou Galileo zjistilo hodnoty od -183°C do -113°C .

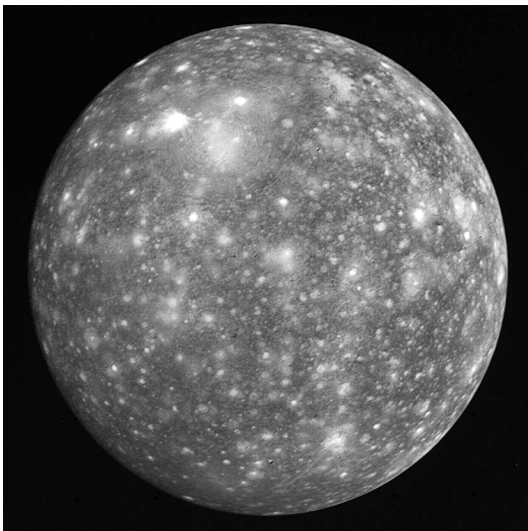
Ačkoliv Ganymed nemá atmosféru, detekoval Hubblův kosmický dalekohled (HST — Hubble Space Telescope) u jeho povrchu ozon. Jeho množství je ovšem mnohem menší než v zemské ozonoféře. Předpokládalo se, že se uvolňuje z molekul vody na povrchu jako následek dopadů elektricky nabitých částic Jupiterovy magnetosféry. Soudilo se také, že podobným procesem by na Ganymedu mohla vznikat řídká kyslíková atmosféra, jaká byla zjištěna i na Europě. Poslední výsledky sondy Galileo ukázaly, že tyto představy bude zřejmě nutno korigovat.

Vnitřní stavba se zpočátku nedala určit jednoznačně. Jde o nediferencovanou směs hornin a ledu? Druhou možností bylo nitro tvořené tenkou chladnou a pevnou ledovou kůrou, pod níž je plášť z měkkého nepříliš zmrazeného ledu a v hloubce se skrývá jádro z hornin a možná i železa. Výsledky sondy Galileo založené na měření gravitačního pole a vln plazmatu Ganymeda potvrdily, že správná je druhá možnost, a ukázaly dokonce, že jádro je z hornin a obsahuje vnitřní jádro kovové. Vnitřní jádro je zahřáté a generuje magnetosféru, patrně stejným dynamovým efektem jako u magnetosféry Země. Magnetosféra Ganymeda má zřetelně definované hranice uvnitř magnetosféry Jupitera a jde o jedinou „magnetosféru v magnetosféře“, kterou ve sluneční soustavě zatím známe.

Kallisto

Ani tento měsíc se nepodobá žádnému z předchozí trojice. Má průměr 4821 km, tedy téměř takový jako planeta Merkur. Kallisto obíhá planetu ve vzdálenosti 1 882 700 km, těsně za vnějším okrajem Jupiterova radiačního pásu, s oběžnou periodou 16,68902 dne. Hustota satelitu byla určena na $1834 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Albedo je už nižší, má hodnotu 0,20. Na denní straně dosahuje teplota -120°C , na noční -190°C . Sonda Galileo zjistila nad satelitem řídkou atmosféru CO_2 .

Uvádí se, že povrch — samozřejmě ledový — je pokryt velkým množstvím impaktních kráterů a že v tomto ohledu drží Kallisto rekord v celé sluneční soustavě. O tomto superlativu by se dalo diskutovat. Na našem Měsíci například pozorujeme oblasti, kde jsou staré krátery postupně zastírány novými, až vznikne chaotický nerovný terén, který však vykazuje zcela určitý charakter. Naproti tomu krátery na Kallistu jsou většinou odděleny rovným terénem. Podle tvrzení odborníků je to proto, že starší krátery byly zarovnané tečením ledu. Je však pravda, že jde o nejpočetnější typ útvarů na satelitu, navíc je nejtypičtější průměr kráterů 30 km.



Obr. 4. Nejvzdálenější z velkých Jupiterových satelitů Kallisto pokrývají četné krátery nevelkých rozměrů v ledové vrstvě. Nedochází však k překrytí starších kráterů mladšími, jak to vidíme v některých oblastech povrchu Měsíce. (Foto: NASA.)

Na měsíci dále nalézáme dvě pánve po obrovských impaktech, a to Valhalla o průměru 3000 km a Asgard s průměrem 1700 km, obě s četnými koncentrickými valy a terénem, jehož nerovnosti byly výrazně vyhlazeny tečením ledu. Jiným typem útvarů jsou kráterové řady, kterých tu bylo nalezeno více než deset. Například Gípul Catena má délku 620 km. Největší kráter v této kráterové řadě má průměr 40 km. Předpokládá se, že řady byly vytvořeny dopadem řetězů úlomků kometárních jader z komet, jejichž jádra byla roztrhána slapovými silami Jupitera.

Kallisto obsahuje množství ledu. Pod kůrou silnou asi 200 km se předpokládá asi 10 km hluboký oceán pravděpodobně slané vody. Pod jeho dnem je vcelku homogenní nitro směsi ledu a hornin. Zastoupení hornin roste směrem ke středu tělesa, nepředpokládá se však existence jádra.

Jupiterovy blízké měsíce

Pokud je známo, obíhají nejbliže u Jupitera satelity Metis, Adrastea, Amalthea a Thebe. Všechny mají nepravidelný tvar. Jejich dráhy mají sklon blízký nule a stejně tak excentricitu. Nejbliž je **Metis**, ve vzdálenosti 128 000 km. Vzdálenost se vždy udává od středu planety, a protože rovníkový poloměr Jupitera je 71 492 km, znamená to, že se Metis pohybuje pouhých 56 508 km nad oblačnou vrstvou planety. Tomu odpovídá i kratičká oběžná doba 0,294 779 dne, tedy asi 7 h 05 min. Metis přitom dosahuje oběžné rychlosti $31,57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy větší, než Země na heliocentrické dráze. Měsíček je nevelký, asi 40 km, a krouží uvnitř Rocheovy meze, která dosahuje 175 000 km od středu Jupitera. Zřejmě jen díky svým malým rozměrům, větší soudržnosti a poněkud větší hustotě $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nepodléhá destrukci. Úniková rychlost z jeho povrchu je pouhých $14,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Jako druhý nejbližší měsíček je známa **Adrastea**, velikosti asi 25/20/15 km, vzdálená 129 000 km (pouhých 1000 km od dráhy Metis) a s oběžnou dobou 0,298 260 dne. Má poměrně velkou hustotu $4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Měsíček Metis objevil S. Synnott v roce 1979, Adrastea byla objevena D. Jewittem a E. Danielsonem ve stejném roce.

Nejnápadnější z rodinky Jupiterových blízkých satelitů je **Amalthea**, objevená E. E. Barnardem již roku 1892. Má velikost 270/168/150 km, velkou poloosu dráhy 181 400 km, oběžnou dobu 0,498 179 dne a hustotu $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Povrch je tmavý (albedo 0,05) a načervenalý pravděpodobně od zaprášení sírou pocházející z vulkánů měsíce Io.

Konečně čtvrtým měsíčkem je **Thebe**, objevený v roce 1979, s velikostí 110/90 km, vzdálený od planety 221 900 km, s oběžnou i rotační periodou 0,674 536 dne, o hustotě $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a nízkým albedem 0,047.

Tyto měsíčky jsou v těsném kontaktu s Jupiterovými prsteny. Vnitřní prstenec sahá od dráhy Adrastey k dráze Amalthey. Vnější prstenec se rozkládá od dráhy Amalthey k dráze Thebe. Prstény jsou tvořeny malými prašnými a ledovými částicemi (meteoroidy) zachycenými Jupiterem z heliocentrických drah a usměrněnými do této oblasti. Měsíce zachycují tyto částice na svých drahách, mohou však být také zdrojem materiálu pro prstény.

Jupiterovy vzdálené měsíce

Právě u této skupiny měsíců můžeme nejspíš předpokládat jejich početní růst. Kromě nepatrného měsíčku Themisto, čtyřikrát vzdálenějšího od planety než Kallisto, jsou jejich vzdálenosti od Jupitera přes 11 milionů km a u nejvzdálenějších známých se už blíží třiceti milionům km. Stojí za povšimnutí, že v intervalu drah s velkou poloosou od 23 do 24 milionů km se „natěsalo“ 18 satelitů, zatímco za obvyklejší považujeme, že s rostoucí vzdáleností od planety rostou vzdálenosti mezi drahami. Je zajímavé, že všechny satelity vzdálenější než 18 milionů km od planety mají zpětný pohyb; je dodržována zásada, že jména těchto satelitů končí na -e (ale s výjimkou Thebe). Vzdálené Jupiterovy měsíce jsou většinou tělíska průměru jen málo kilometrů. Nepříliš výraznou výjimku představují Himalia (o průměru 170 km), Lysithea (36), Elara (86), Ananke (28), Carme (46), Pasiphae (60) a Sinope (38 km). Půjde-li to tak dál, stanou se články o objevu nových měsíců hodně nudným čtením.

Pokračování příště.